

“互联网+”废旧手机回收模式效率提升问题研究*

李春发 安静宙[#]

(天津理工大学管理学院, 天津 300384)

摘要 手机更新换代不断加快, 高效且规范地回收不断增加的废旧手机成为目前亟待解决的社会难题, “互联网+”废旧手机回收模式的出现和不断完善使该难题的破解成为可能。在对影响回收效率的各因素及其相互关系进行分析的基础上, 构建“互联网+”废旧手机回收模式的系统动力学模型, 利用 Vensim 软件绘制因果回路图、存量流量图, 并收集相关数据, 针对废旧手机回收价格、信息安全性和物流费用对回收模式效率影响情况进行仿真分析。研究表明, 信息安全性是影响“互联网+”废旧手机回收模式效率最重要的因素。

关键词 “互联网+” 废旧手机回收 效率 系统动力学

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.01.022

Research on efficiency improvement of “Internet+” used phones recycling mode based on system dynamics LI Chunfa, AN Jingzhou. (School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract: Fast advancement in technology provides better phones and forces consumers to change their phones frequently, which in turn results in large amount of used phones needed to be recycled efficiently and environmentally. The appearance and improvement of “Internet+” used phone recycling mode makes it possible to solve this problem. System dynamic model was established based on analyzing the factors which influenced efficiency of “Internet+” used phone recycling mode. Causal loop diagrams and stock-flow diagrams were drawn by using Vensim. Relevant statistics have been collected and simulation analyzing was performed on effects of recycling price, information security and logistics fee on efficiency of “Internet+” used phone recycling mode. The simulation results showed that information security was the key factor which influenced the efficiency of “Internet+” used phone recycling mode.

Keywords: “Internet+”; recycling of used phones; efficiency; system dynamic model

随着智能手机的不断更新与快速普及, 移动互联网技术的不断发展与日益创新, 消费者需求不断提升, 手机更新换代的速度不断加快, 手机销售量逐年快速上升。2014年, 我国手机销售量达4.06亿部, 同时废旧手机量也达4亿部^[1]。废旧手机作为一种特殊的小型电子产品, 具有体积小、残值消失快、回收价格低、私密性高、资源性强和危害性大等特点, 目前废旧手机回收模式不规范、不安全、不便捷, 且回收成本高等, 以上原因导致了废旧手机回收困难, 有效回收率不足1%, 大量废旧手机闲置, 造成巨大的资源浪费和严重的环境安全隐患。2015年2月, 国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)公布的新版《废弃电器电子产品处理目录》将废旧手机纳入其中, 废旧手机回收模式的规范化和高效化受到了政府的关注和重视。2016年3月1日, 该目录正式实施, 废旧手机回收的政策陆续出台。而近年来出现的“互联网+”废旧手机回收模式使得

废旧手机回收困境的破解成为可能^[2]。2015年10月, 国家发改委、环境保护部携中国再生资源回收利用协会及企业代表, 对我国目前“互联网+”废旧手机回收模式的现实运行情况开展了实地调研, 指出该模式通过互联网交互平台打通了消费者和回收商之间的信息壁垒, 极大降低了废旧手机回收的交易成本, 但消费者接受度、认可度和普及度还有待提高, 模式运行的规范性需要完善, 效率需要不断提升, 同时政府部门还需要为该模式的科学发展提供有效的政策支持。

1 研究现状

“互联网+”废旧手机回收是近几年出现的一种新型的消费者到企业(C2B)电子商务模式, 它带来回收市场环境虚拟化、市场形态多元化、交易过程柔性化和服务流程智能化, 使得废旧手机回收在交易、定价、沟通、监管和功能等方面发生了巨大改变, 让

第一作者: 李春发, 男, 1968年生, 博士, 教授, 主要从事生态工业系统优化与决策分析研究。[#] 通讯作者。

* 天津市科技计划项目(No.12ZLZLZF06300)。

交易双方形成一种脱离时空限制的供求关系,将大量分散的消费者与分布式的回收企业连接起来。事实上,“互联网+”回收模式已引起了政界、业界和学界的重视。2015年4月,国家发改委发布的《2015年循环经济推进计划》中明确提出推动和引导回收模式创新,鼓励企业探索“互联网+”回收的模式及路径,实现线上回收线下物流的融合,搭建科学高效的回收系统。2016年,《“互联网+”绿色生态三年行动实施方案》要求企业充分利用互联网平台,提高再生资源交易的便捷度、透明度和灵活度,从国家政策和具体行动层面鼓励和支持“互联网+”回收模式的创新与推广。实际上,基于互联网的废旧商品网络回收模式较早就引起了业界和学界的注意,并随着移动互联网、电子支付和电子商务的普及,近两年废旧手机“互联网+”回收网站不断涌现。陆静^[3]对最早成立的上海新锦华在线回收模式进行了分析,并提出了模式的发展设想。鲁军^[4]将绍兴市回收行业现状与电子商务相结合,构想网络回收平台架构。曲丽赢^[5]分析了在线回收模式的发展优势及瓶颈,并指出引进多元的战略投资者和进行企业改制是在线回收模式的发展方向。薛光明^[6]研究了上海新锦华从创立到发展的全过程,认为在线回收是未来的发展趋势,并提出了其发展的困境及应对策略。李春发等^[7]对网络回收模式的利益相关者及其协调机制问题进行了研究。韩璐等^[8]对“爱回收”的发展模式进行了分析,认为与京东等电商平台合作的回收模式使其用户量得到迅速增长。CUCCHIELLA等^[9]对在线回收模式的经济效益及营销推广方式进行了分析。宋庆彬等^[10]分析了“互联网+”资源回收的流程及特点,并指出该模式下资源回收面临的新契机及新挑战。刘永清^[11]分析了“互联网+”对家电逆向物流的影响及营销策略变革问题。周永生等^[12]指出了“互联网+”回收模式的发展优势和局限,认为该模式是未来发展趋势。杜志平等^[13]考虑手机制造商建立回收网站回收废旧手机的情况,设计了回收的流程,并对回收量和总体利润等进行了数值仿真。

显然,上述研究均是从回收企业(平台)视角考虑如何对“互联网+”回收模式进行完善,以及对利益相关者进行正向激励。但“爱回收”、回购网、淘绿网等现有大量“互联网+”废旧手机回收模式的运营业绩并不理想,回收效率有待提升。有业内人士指出,“互联网+”回收模式涉及众多利益相关者、影响因素和作用机制,其效率提升

是一个复杂的系统工程。而YIN等^[14]、YLÄMELLA等^[15]和SARATH等^[16]指出,消费者回收行为是影响废旧手机回收效率的关键。李春发等^[17-18]以“爱回收”为例,研究了影响消费者废旧手机回收意愿的主要因素,实证了对回收网站的信任有助于提升消费者的回收意愿。在此基础上,本研究利用系统动力学方法,将废旧手机回收价格、信息安全性和回收物流费用等对“互联网+”废旧手机回收模式效率的影响进行分析,为该模式效率的提升提出有效的对策措施。

2 “互联网+”废旧手机回收模式描述

“互联网+”废旧手机回收模式如图1所示。在回收模式运行过程中,消费者向网络回收网站提供废旧手机的品牌、机型、外观和运行情况等信息,据此反馈回收价格。消费者若认同回收价格,回收网站选取上门或委托第三方物流的方式进行回收。收到废旧手机后,对其进行专业检测,若检测结果与消费者描述吻合,通过第三方支付平台向消费者付款,回收网站再根据废旧手机的情况进行相应的资源化处理。

对于具有较高再利用价值的废旧手机,可以通过清洁、维修或再制造后,转入二手市场进行二次销售;而对再利用价值较低的废旧手机,交由专业废旧手机处理企业进行拆解和深度处理,提取有用零部件和原料销售给生产企业和原材料供应商,其他有毒物质进行无害化处理。

“互联网+”废旧手机回收模式在运行过程中,还需要政府部门、行业协会、网络技术服务提供商、其他合作企业和媒体等的支持与协作,各利益相关者明确自身责任、相互合作才能确保该模式的高效运行。

3 “互联网+”废旧手机回收模式系统动力学模型构建

3.1 模型构建要素确定

“互联网+”废旧手机回收模式运行一方面受模式自身结构要素(如回收价格、物流成本和回收补贴等)影响,另一方面受传统废旧手机回收模式(如个体回收商数量、回收价格等)影响,此外还受消费者手机更换频率、废旧手机总量等环境因素影响。根据相关研究成果,可以确定“互联网+”废旧手机回收模式系统动力学模型构建要素,如表1所示。

资料来源:根据作者访谈整理。http://www.zjepc.com

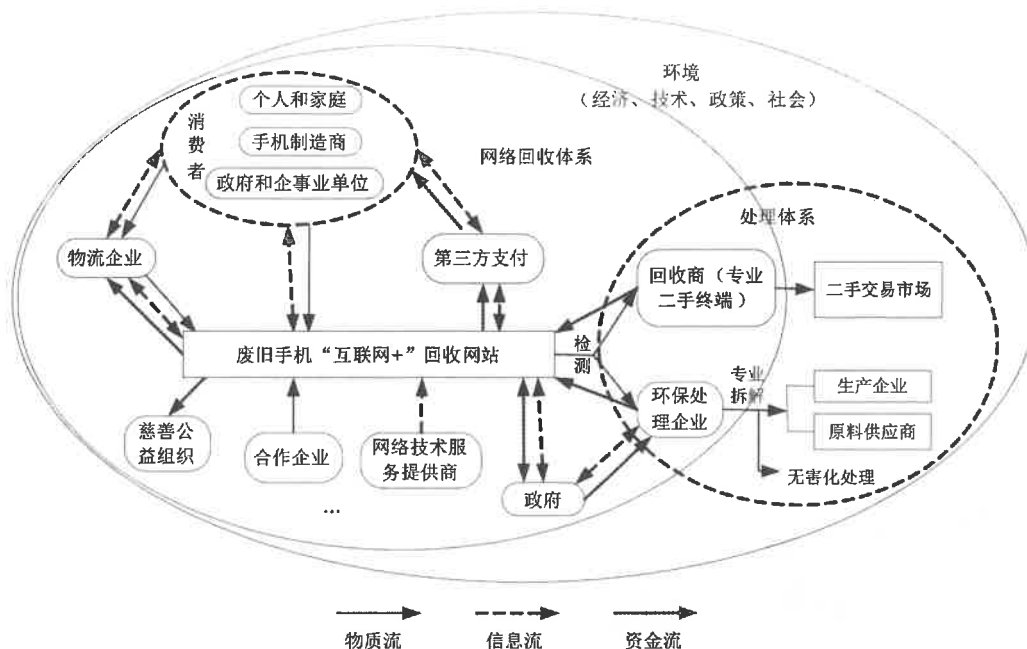


图1 “互联网+”废旧手机回收模式

Fig.1 “Internet+” used phone recycling mode

表1 系统动力学模型构建要素
Table 1 Elements of system dynamic model construction

类型	变量
“互联网+”回收	“互联网+”回收网站的数量
	“互联网+”回收废旧手机的平滑量
	“互联网+”回收价格
	“互联网+”回收废旧手机的数量
	平均每个网站每年回收废旧手机的数量
	“互联网+”回收商投入的物流平均费用
	“互联网+”回收商投入的物流总费用
	“互联网+”回收商投入的信息安全平均成本
	“互联网+”回收商投入的信息安全总成本
	个体回收商与“互联网+”回收商回收的价格差额
传统个体回收	每台废旧手机受拆解后有价物
	市场平均价格影响的回收价格
	政府给予“互联网+”回收商的回收补贴
	其他因素影响的“互联网+”回收价格
其他	个体回收商的数量
	个体回收价格
	平均每个个体回收商每年回收废旧手机的数量
	个体回收废旧手机的数量
	消费者家中正在使用的手机数量
	消费者购买新手机的数量
	手机的更换速率
	消费者家中废旧手机的数量
	手机的平均使用寿命
	平滑时间

3.2 因果回路图构建

根据上面的分析,构建“互联网+”废旧手机回收模式系统动力学模型的因果回路图。因果回路图用于描述各变量间反馈关系,箭头处正号表示箭头指向的变量将随箭头源发变量增加而增加,负号表

示箭头指向的变量将随箭头源发变量增加而减少^[19]。利用系统动力学仿真软件 Vensim 可绘制“互联网+”废旧手机回收模式的因果回路图,结果如图2所示。其中,关键的反馈环如下:

(1) “互联网+”回收废旧手机的数量→+个体回收的价格→+个体回收与“互联网+”回收的价格差额→+平均每个网站每年回收的废旧手机的数量→+“互联网+”回收废旧手机的数量。该反馈环表示“互联网+”回收废旧手机数量越多,个体回收价格越高,个体回收与“互联网+”回收价格差额变大,从而导致“互联网+”回收废旧手机数量增加。

(2) 个体回收废旧手机的数量→+“互联网+”回收商投入的信息安全平均成本→+“互联网+”回收商投入的信息安全总成本→+平均每个网站每年回收的废旧手机的数量→+“互联网+”回收废旧手机的数量→+个体回收废旧手机的数量。该反馈环表示个体回收废旧手机数量越多,“互联网+”回收商会增加信息安全成本,吸引更多消费者交投废旧手机来提高回收量,在废旧手机数量一定时,个体回收废旧手机量会减少。

(3) 个体回收废旧手机的数量→+“互联网+”回收商投入的物流平均费用→+“互联网+”回收商投入的物流总费用→+平均每个网站每年回收的废旧手机的数量→+“互联网+”回收废旧手机的数量→+个体回收废旧手机的数量。该反馈环表示个体回收废旧手机数量越多,“互联网+”回收商会加

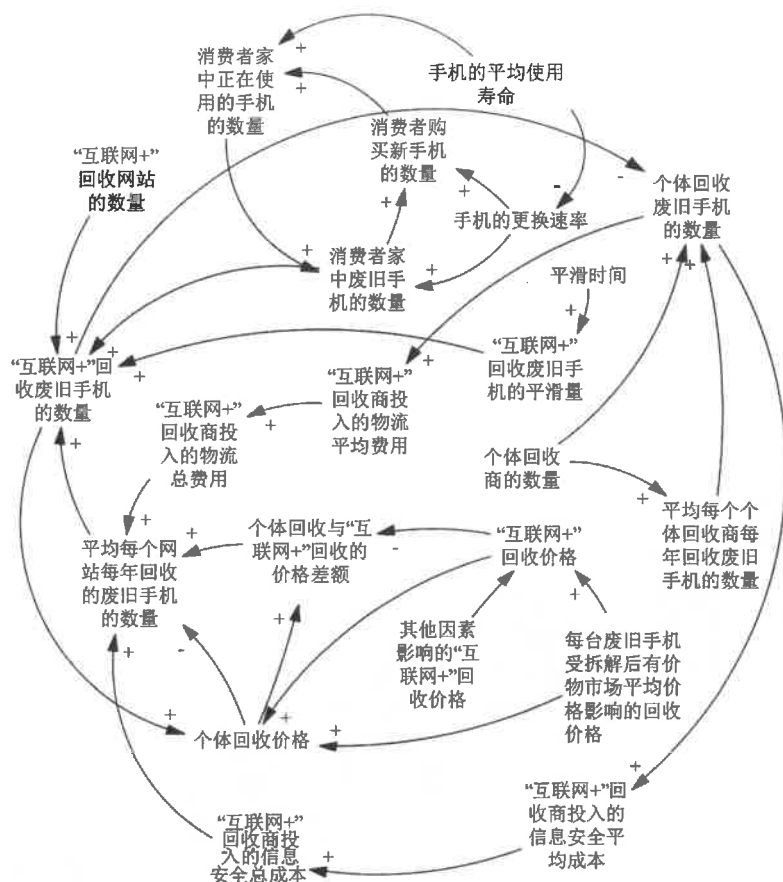


图2 “互联网+”废旧手机回收模式因果回路图

Fig.2 Causal loop diagrams of "Internet+" used phone recycling mode

大物流费用投入来提高回收量,个体回收废旧手机数量将相应减少。

因果回路图不仅包括正负反馈环,还包括不参与构成反馈环变量,这些变量与其他变量构成因果链。如:手机的平均使用寿命 $\rightarrow$ -手机更换速率 $\rightarrow$ +消费者家中废旧手机的数量,说明手机平均使用寿命越长,手机更换速率越低,消费者拥有废旧手机数量越少;“互联网+”回收网站的数量 $\rightarrow$ +“互联网+”回收废旧手机的数量,说明“互联网+”回收网站数量增加,则“互联网+”回收废旧手机数量相对增加。

3.3 存量流量图绘制

在因果回路图基础上,绘制“互联网+”废旧手机回收模式的存量流量图(见图3),进一步区分各变量的性质,更加直观地刻画模式运行中各变量间的逻辑关系,明确系统反馈形式和控制规律。

存量是描述系统积累效应的状态变量,在图 3 中用矩形符号表示。状态变量有相对固定的计算格式,即现在积累值等于前次积累值加上输入流与输

出流的差与观察时间间隔的乘积^[20]。

流量是描述系统中积累效应随时间变化快慢的变量,是数学意义上的倒数。流量描述符号为 F 。

4 模型仿真与影响因素分析

以淘绿网、“爱回收”等正规“互联网+”废旧手机回收网站为研究对象,收集相关的数据资料,通过建立相应的系统动力学模型,进行仿真分析。在进行系统动力学仿真前,对模型的表函数、常数和状态变量进行初始化赋值。

4.1 参数设置

根据相关数据资料,对“互联网+”废旧手机回收模式运行的系统动力学模型参数作如下规定:

(1) 废旧手机回收网站初值为 30 个,个体回收商的数量为 6 524 个。

(2) 废旧手机拆解后金、银和铜等贵金属及可重复利用零部件等的市场平均价、最低价和最高价分别为 41.62、2.00、80.00 元, 标准差为 39.42 元。由于金属市场价格波动, “互联网+”回收商的回收

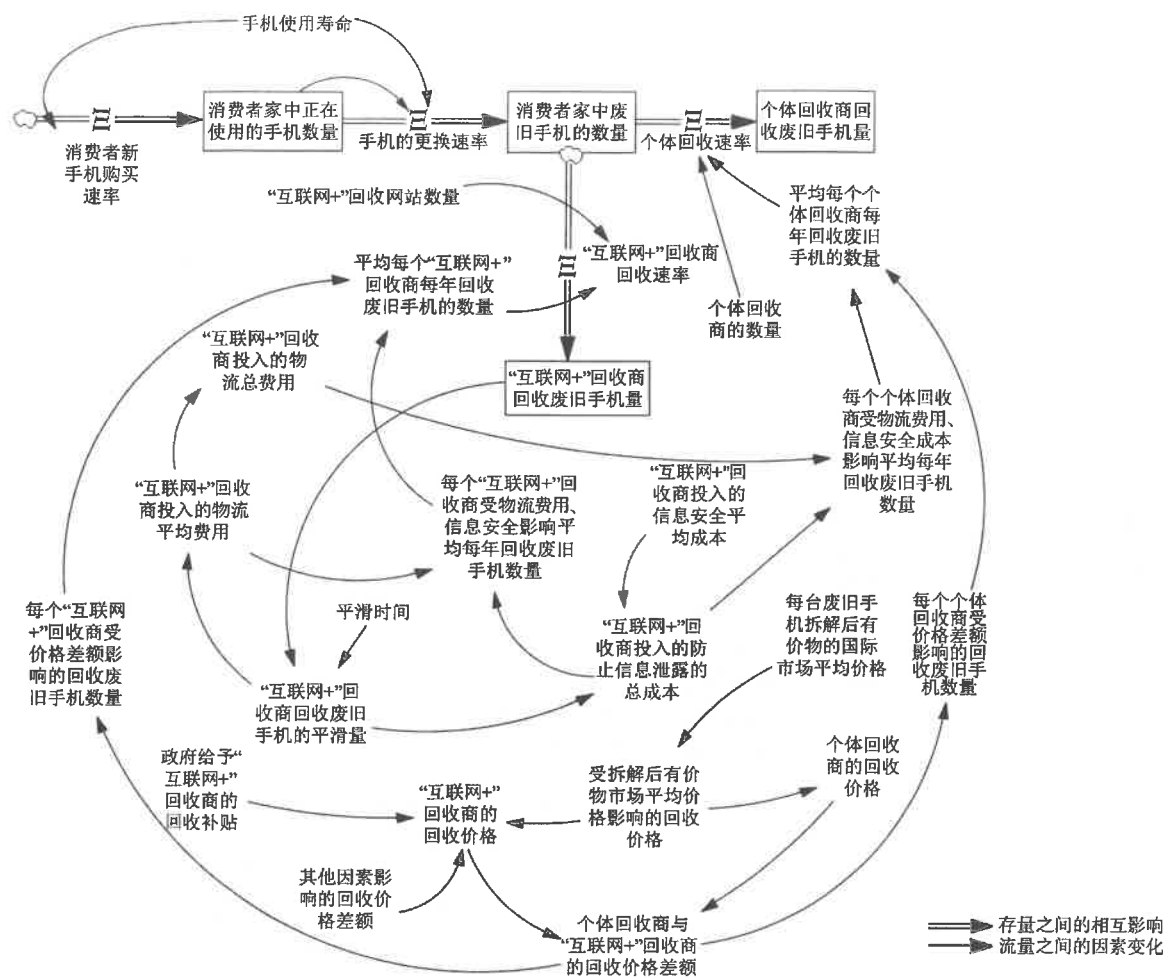


图3 废旧手机回收模式存量流量图

Fig.3 Stock-flow diagram of "Internet+" used phone recycling system dynamic model

价格也波动,为此建立相应表函数。同理,回收价格波动导致个体回收商与“互联网+”回收商回收价格差额波动,受价格差额影响的“互联网+”回收及个体回收废旧手机数量也用相应表函数表达。

(3) 个体回收价格为受拆解后有价物市场平均价格影响的回收价格 + RANDOM NORMAL (-70, 50, -10, 60, -10) 均值 (RANDOM NORMAL 是随机均匀分布函数,其中涉及的 5 个参数依次为最大值、最小值、均值、标准差和初始值),即个体回收价格在受拆解后有价物市场平均价格影响的回收价格的基础上平均低 10 元。

(4) 政府给予“互联网+”回收商回收补贴初值为 3 元/台。2014 年,国家发改委资源节约和环境保护司发布《废弃电器电子产品处理目录调整重点(征求意见稿)》,将手机作为重点项目列入其中,预示政府会在手机回收方面采取相关措施。本研究将政府给予“互联网+”回收商回收补贴列为提高“互联网+”回收效率策略之一。根据其废旧手机回

收量影响程度的大小决定该策略是否可行。

(5) “互联网+”回收商投入的信息安全平均成本初值为 1 元/台。

(6) “互联网+”回收商投入的物流平均费用初值为 3 元/台。

(7) 手机更换速率为消费者拥有正在使用的手机数量/手机平均寿命。

4.2 模型仿真

4.2.1 现实性测试

测试 1:个体回收的平均回收价格提高 10 元。受拆解后有价物市场平均价格影响的回收价格 + RANDOM NORMAL (-70, 50, -10, 60, -10) 均值变为受拆解后有价物市场平均价格影响的回收价格 + RANDOM NORMAL (-60, 60, 0, 60, -10) 均值,仿真结果如图 4 所示。

测试 2:回收网站数量增加,由 30 变为 60,仿真结果如图 5 所示。

从图 4 仿真结果可知,个体回收的平均回收价

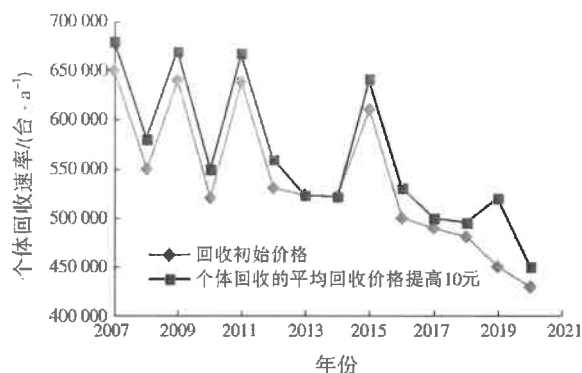


图4 个体回收的平均回收价格提高10元的现实性测试结果

Fig.4 Realistic test result of changes in individual recycling price improvement of 10 yuan

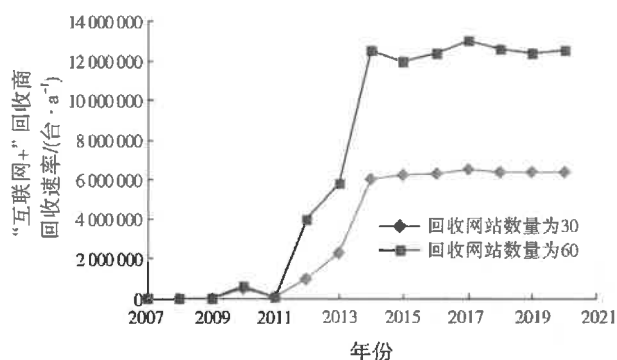


图5 回收网站数量增加的现实性测试结果

Fig.5 Realistic test result of changes in recycle website amount

格提高10元后,个体回收速率高于初始状态,这与实际情况相符,通过现实性测试。从图5仿真结果可知,回收网站数量增加1倍后,“互联网+”回收商回收速率远高于初始状态,与实际情况相符,也通过现实性测试。

4.2.2 极限测试

假设手机平均使用寿命分别为1、3、10 a,进行极限测试,仿真结果如图6所示。

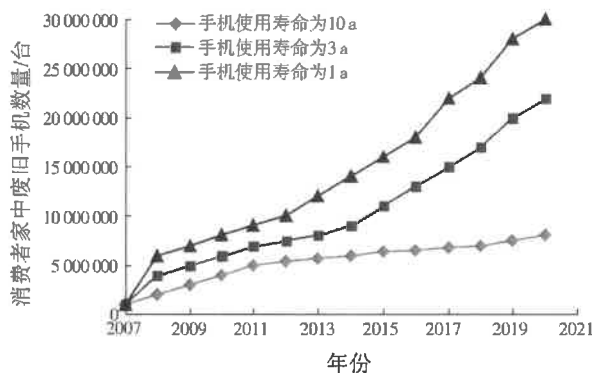


图6 手机平均使用寿命极限测试结果

Fig.6 The limit test results of average service life of the phones

在消费者购买手机速率不变情况下,若手机平

均使用寿命为1 a,闲置废旧手机量大幅增加;若手机平均使用寿命为10 a,闲置废旧手机量相比手机平均使用寿命为1 a时大幅减少。实际上,随着智能手机的普及、技术的不断进步和消费需求的不断提升,消费者手机更新速度越来越快,手机使用寿命越来越短。模型仿真结果真实反映了上述现实规律,极限测试通过。

4.3 影响因素分析

根据相关研究,在“互联网+”废旧手机回收模式的运行过程中,消费者交投废旧手机主要考虑回收价格、信息安全性及物流费用3个因素。下面分别讨论3个因素对模式运行效率的影响情况。

在“互联网+”废旧手机回收模式的运行过程中,废旧手机回收价格主要受手机制造原料的市场平均价格、废旧手机性能状况和回收补贴等影响。目前,国家没有相关补贴,但随着废旧手机回收的规范化,回收基金建立和补贴政策实施将是今后的发展趋势。政府给予“互联网+”回收商回收补贴分别为3、8、15元/台时,“互联网+”回收商和个体回收商受回收价格差额影响的仿真结果分别如图7和图8所示。

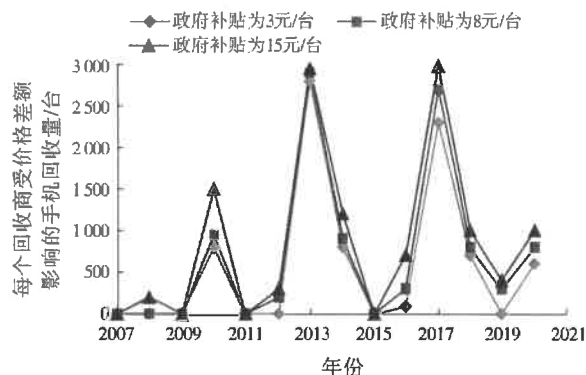


图7 “互联网+”回收商受价格差额影响的手机回收量

Fig.7 Recycled quantity of “Internet+” recyclers affected by price margin

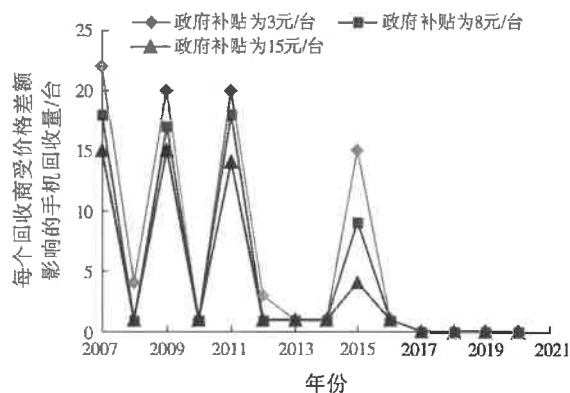


图8 个体回收商受价格差额影响的手机回收量

Fig.8 Recycled quantity of individual recyclers affected by price margin

比较图7和图8可以看出,政府给予“互联网+”回收商回收补贴增多,其回收数量增加越迅速,从而使个体回收手机数量减少。但政府补贴较少时,对个体手机回收量的影响并不明显。需要说明的是,虽然研究结果显示达到一定量的政府补贴才会对手机回收效率的影响较大,但这只是理论结果,具体的补贴策略实施要根据政府能力决定。

在手机信息安全性方面,消费者难以将手机中信息彻底删除,且无法防止个体回收商利用手机信息进行牟利行为,但规范的“互联网+”回收商可通过签订安全协议、办理信息安全保险等确保信息安全,使消费者放心交投。“互联网+”回收商信息安全投入成本分别为1、6、10元/台时,“互联网+”回收商和个体回收商受其影响的仿真结果分别如图9和图10所示。

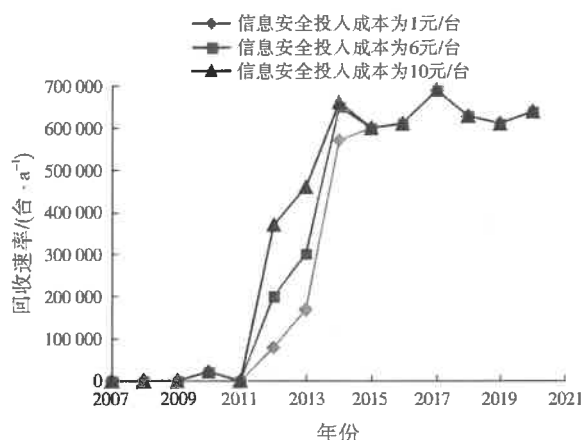


图9 “互联网+”回收商受信息安全投入成本影响的回收速率

Fig.9 Recycle rate of “Internet+” recyclers affected by information security cost

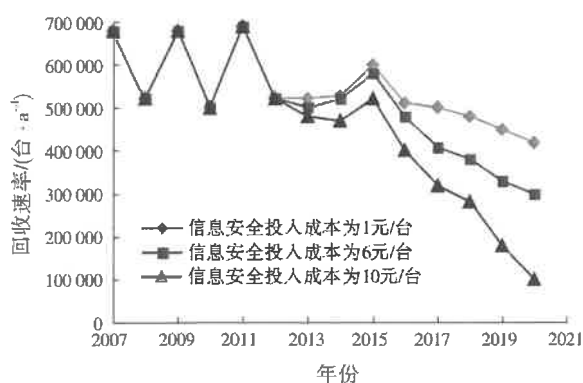


图10 个体回收商受信息安全投入成本影响的回收速率

Fig.10 Recycle rate of individual recyclers affected by information security cost

比较图9和图10可以看出,在起初几年信息安全投入对“互联网+”手机回收速率影响不明显,这可能是由于“互联网+”回收模式未盛行时,废旧手

机主要依靠个体回收商回收。而随着智能手机的普及,废旧手机量的不断增加,消费者对手机信息安全越来越重视,造成大量废旧手机闲置。“互联网+”废旧手机回收模式的出现及不断完善和规范,信息安全投入成本对废旧手机回收影响增强。因此,“互联网+”回收商应加大手机信息安全投入,建立良好信誉和声誉,赢得消费者信任。

“互联网+”废旧手机回收模式往往需要消费者支付相应的物流费用(废旧手机邮寄费),若回收的废旧手机再利用价值或残值不高,物流费用的高低将严重影响消费者的回收决策行为。“互联网+”回收商投入的物流费用对“互联网+”废旧手机回收模式影响的仿真结果如图11所示。

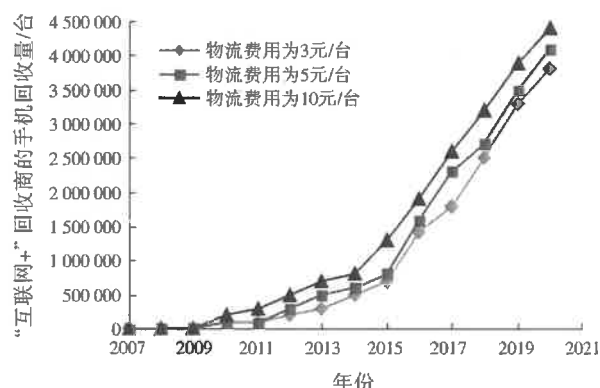


图11 物流费用对“互联网+”废旧手机回收模式的影响

Fig.11 Influence of logistics fees on “Internet+” used phone recycling mode

由图11可以看出,随着“互联网+”回收商投入的物流费用不断增加,消费者需要承担的物流费用就会减少或减免,从而激发了消费者交投废旧手机的欲望,导致“互联网+”回收商的手机回收量呈增加趋势。建议“互联网+”回收商与物流公司合作或采取上门取件方式,在减少或减免消费者的物流费用的同时,降低手机回收的物流成本,从而提升“互联网+”废旧手机回收模式效率。

5 结语

废旧手机的信息安全性对“互联网+”废旧手机回收模式的回收效率影响最大,说明随着手机回收业的发展,人们更加关注废旧手机信息的安全性问题,废旧手机存储的信息对消费者具有重要影响,若信息的安全性得不到保证,消费者不会将废旧手机进行回收处理,这也是大量废旧手机长期闲置的主要原因。因此,“互联网+”废旧手机回收模式效率的提升首先要建立良好的信息安全保障机制,树立

良好的声誉和信誉。废旧手机回收价格和物流费用对“互联网+”废旧手机回收模式效率也有一定影响,小幅提高回收价格和减少物流费用对回收效率影响不显著,但大幅提高将造成回收平台(企业)的成本负担。因此,为了提升“互联网+”废旧手机回收模式效率,政府可以制定相关政策,对该模式运行提供相应的资金支持和政策性扶持,从而有效促进模式的可持续健康发展。

参考文献:

- [1] 吕绍刚,王星.我国每年产生废旧手机 4 亿部 回收产业发展滞后[N].人民日报,2015-10-12(14).
- [2] 淘绿网.淘绿手机线路板拆卸机获专利[EB/OL].[2016-11-07].<http://www.taolv365.com/html/20151105/05174426787.html>.
- [3] 陆静.上海新锦华回收物流发展设想[J].运输经理世界,2008,11(16):24-26.
- [4] 鲁军.论绍兴再生资源产业链的补缺[J].科技传播,2011(8):48-50.
- [5] 曲丽赢.在线收废:如何才能走得更远? [N].中华合作时报,2010-04-20(A04).
- [6] 薛光明.“在线收废”现状及发展趋势[J].中国科技投资,2010(12):74-76.
- [7] 李春发,杨琪琪,韩芳旭.基于 C2B 的废弃电器电子产品网络回收系统利益相关者关系研究[J].科技管理研究,2014,34(23):233-239.
- [8] 韩璐,阿细.“爱回收”上门[J].21 世纪商业评论,2014(17):60-61.
- [9] CUCCHIELLA F, D'ADAMO I, KOH S C L, et al. Recycling of WEEEs: an economic assessment of present and future e-waste streams[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 263-272.
- [10] 宋庆彬,张宇平,缪友萍,等.“互联网+资源回收”模式助推中国资源回收革命[J].环境污染与防治,2016,38(8):105-109.
- [11] 刘永清.“互联网+”战略下家电逆向物流营销模式的变革[J].中国流通经济,2015,29(6):30-35.
- [12] 周永生,高山.创新驱动下基于 O2O 视角的城市矿产“互联网+回收”模式构建研究[J].开发研究,2015(4):29-32.
- [13] 杜志平,王晓强.基于 O2O 的手机逆向供应链回收模式研究[J].物流技术,2015,34(6):198-201.
- [14] YIN J F, GAO Y N, XU H. Survey and analysis of consumers' behaviour of waste mobile phone recycling in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 517-525.
- [15] YLÄ MELLA J, KEISKI R L, PONGRÁCZ E. Electronic waste recovery in Finland: consumers' perceptions towards recycling and reuse of mobile phones[J]. Waste Management, 2015, 45: 374-384.
- [16] SARATH P, BONDA S, MOHANTY S, et al. Mobile phone waste management and recycling: views and trends[J]. Waste Management, 2015, 46: 536-545.
- [17] 李春发,邹雅玲,王雪红.WEEE 回收网站交互性对消费者回收行为的影响——消费者交易感知的中介作用[J].科技管理研究,2015,35(3):209-214.
- [18] 李春发,董明英.手机回收网站初始信任影响因素实证研究[J].价值工程,2015,34(31):190-192.
- [19] 王其藩.高级系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [20] 李旭.社会系统动力学[M].上海:复旦大学出版社,2009.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2016-11-16)

(上接第 87 页)

- [20] HSU S C, LIU S C, KAO S J, et al. Water-soluble species in the marine aerosol from the northern South China Sea: high chloride depletion related to air pollution[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D19): 216-229.
- [21] TIAN Y Z, WANG J, PENG X, et al. Estimation of the direct and indirect impacts of fireworks on the physicochemical characteristics of atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(18): 9469-9479.
- [22] BI X H, FENG Y C, WU J H, et al. Source apportionment of PM₁₀ in six cities of northern China[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(5): 903-912.
- [23] XUE Y H, WU J H, FENG Y C, et al. Source characterization and apportionment of PM₁₀ in Panzhihua, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2010, 10(4): 367-377.
- [24] 宋娜,徐虹,毕晓辉,等.海口市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 来源解析[J].环境科学研究,2015,28(10):1501-1509.
- [25] CAO J J, LEE S C, HO K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(11): 1451-1460.
- [26] CASTRO L M, PIO C A, HARRISON R M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(17): 2771-2781.
- [27] DRAXLER R, STUNDER B, ROLPH G, et al. HYSPLIT 4 user's guide[R]. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014.
- [28] 魏玉香,杨卫芬,银燕,等.霾天气南京市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征[J].环境科学与技术,2009,32(11):66-71.
- [29] 刘爱霞,韩素芹,姚青,等.2011 年秋冬季天津 PM_{2.5} 组分特征及其对能见度的影响[J].气象与环境学报,2013,29(2):42-47.
- [30] ARIMOTO R, DUCE R A, SAVOIE D L, et al. Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West A[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D120): 2011-2023.
- [31] YAO X H, CHAN C K, FANG M, et al. The water soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(26): 4223-4234.
- [32] DAN M, ZHUANG G S, LI X X, et al. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(21): 3443-3452.
- [33] CHOW J C, WATSON J G, LU Z Q, et al. Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(12): 2079-2112.
- [34] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(2): 24-26.
- [35] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2016-12-23)